

## 모노펄스 레이더에 대한 전파왜곡 시스템의 요구 성능 분석

### Required Performance Analysis of Wavefront Distortion System against Monopulse Radar

장연수 · 김기백 · 박진태 · 이창훈

Yeonsoo Jang · Ghiback Kim · Jintae Park · Changhoon Lee

#### 요 약

모노펄스 레이더에 대한 효과적인 재밍은 전파를 왜곡시키는 것이다. 그 중 대표적인 전파왜곡 기법은 두 개의 송신기를 이용하는 크로스 아이 기법이다. 크로스 아이 기법은 모노펄스 레이더의 구현 구조에 관계없이 각도를 기만할 수 있지만, 충분한 각도기만 효과를 갖기 위해서는 두 송신기의 위상 및 진폭 정확도가 확보되어야 한다. 이러한 위상 및 진폭 정확도는 전파왜곡 시스템을 구현하는데 있어서 핵심적인 요구 성능 파라미터이고, 목표로 하는 각도 오차에 따라 그 요구값이 달라진다. 본 논문에서는 목표로 하는 각도 오차에 따라 필요한 최소 위상차 및 진폭비를 수식으로 유도하고 그 결과를 분석한다.

#### Abstract

One of the effective jamming methods to disturb monopulse radars is a wavefront distortion. Most well-known wavefront distortion is the cross eye technique which uses two transmitters. The cross eye can make angle error regardless of monopulse radar structure but high accuracies of phase and amplitude between two transmitters should be needed to make large angle error. Thus, the accuracies of phase and amplitude are essentially required performance parameters for implementation of wavefront distortion systems and the required values of accuracy is dependant on amount of angle error. In this paper, we derive expressions for minimum required values of phase difference and amplitude ratio according to amount of angle error and analyze the results.

Key words: Monopulse Radar, Wavefront Distortion, Cross Eye, Angle Error, Phase and Amplitude Accuracies

#### I. 서 론

현대의 레이더 시스템에서는 목표물의 각도를 추적하기 위해 모노펄스 방식을 널리 사용하고 있다<sup>[1],[2]</sup>. 이러한 모노펄스 레이더는 단일 펄스를 이용하여 목표물의 각도를 추정하기 때문에 원추형 탐색(conical scan)과 같은 기존의 시간 순차적 각도 추정 방식에 비해 재밍 신호에 강인하다. 이러한 모노펄스 레이더를 재밍하기 위한 효과적

인 방법은 모노펄스 레이더로 수신되는 전파면을 왜곡시켜 각도 추정 오차를 발생시키는 것이다<sup>[3]</sup>. 대표적인 전파왜곡 기법인 크로스 아이(cross eye) 기법은 모노펄스 레이더로부터 수신된 신호를 서로 다른 위상으로 송신함으로써 왜곡된 전파면을 생성한다<sup>[4]</sup>. 이때 크로스 아이 이득값이 클수록 큰 각도 오차를 발생시킬 수 있으며, 크로스 아이 이득값은 양쪽 송신기의 위상 및 진폭 정확도에 의해서 결정된다<sup>[5]</sup>. 즉, 위상 및 진폭 정확도는 전파왜

국방과학연구소 제2기술연구본부(The 2nd R&D Institute, Agency for Defense Development)

· Manuscript received April 6, 2016 ; Revised June 21, 2016 ; Accepted June 22, 2016. (ID No. 20160406-036)

· Corresponding Author: Yeonsoo Jang (e-mail: ysjang83@add.re.kr)

꼭 재밍 시스템을 설계하고 구현하는 데 있어서 중요한 파라미터이다.

일반적으로 레이더에 대한 재밍 시스템은 수십 GHz 범위의 광대역을 다루기 때문에 크로스 아이 시스템을 구현하는데 있어서 위상 및 진폭을 정확하게 맞추는 것은 어려운 일이며, 정확도를 향상시키기 위해서는 구현의 복잡도와 비용이 급증하게 된다. 그러므로 목표로 하는 크로스 아이 이득에 따라 요구되는 최소 위상차 및 진폭비를 계산할 수 있다면, 재밍 시스템을 설계하고 구현하는 데 있어서 중요한 기준이 될 것이다.

본 논문에서는 목표 크로스 아이 이득값을 만족할 수 있는 위상차 및 진폭비의 범위를 수학적으로 유도하고 그 결과를 분석한다.

### II. 시스템 모델

크로스 아이 시스템의 블록도는 그림 1과 같다<sup>[5]</sup>.

그림 1과 같이 전형적인 크로스 아이 시스템은 2개의 재머에서 신호를 서로 교차하여 수신/송신하는 역지향 (retrodirective) 구조를 사용한다. 재머 1에서 수신된 모노펄스 레이더 신호는 재머 2에서 동위상으로 송신되고, 재머 2에서 수신된 모노펄스 레이더 신호는 재머 1에서 180° 위상 변환되어 송신된다. 이때, 크로스 아이 시스템의 재밍 효과를 그림 2에 나타내었다. 본 논문에서는 재밍 신호 세기가 충분히 클 경우, 일반적으로 사용되는 근사 모델을 적용하였다<sup>[5]</sup>.

여기서  $L$ 은 두 재머 사이의 거리,  $R$ 는 모노펄스 레이더와 재머 중점과의 거리,  $\Delta\theta$ 는 모노펄스 레이더와 두

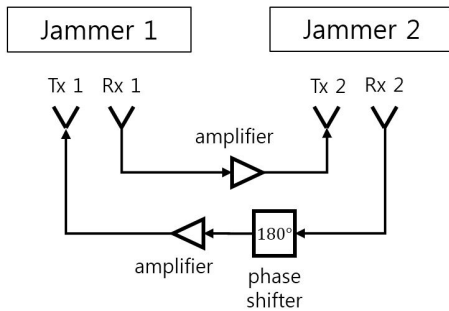


그림 1. 크로스 아이 시스템 블록도  
Fig. 1. Block diagram of cross eye system.

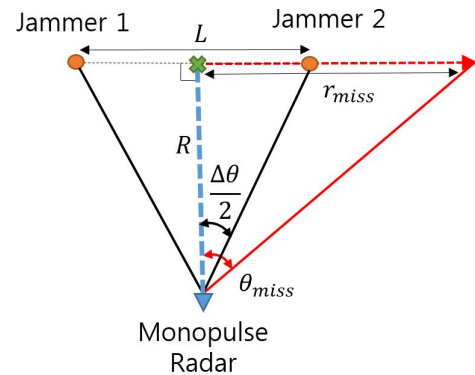


그림 2. 크로스 아이 시스템의 재밍 효과  
Fig. 2. Jamming effect of cross eye system.

재머가 이루는 각도,  $\theta_{miss}$ 는 크로스 아이로 인해 발생하는 각도 오차,  $r_{miss}$ 는 재머 중점으로부터 기만되는 거리이다.  $r_{miss}$ 는 다음과 같이 나타내어진다<sup>[5]</sup>.

$$\begin{aligned} r_{miss} &= R \cdot \tan \theta_{miss} \\ &= R \cdot \tan \frac{\Delta\theta}{2} G_c \\ &= R \cdot \frac{L}{2R} \cdot G_c \\ &= \frac{L}{2} \cdot G_c \end{aligned} \tag{1}$$

여기서  $G_c$ 는 크로스 아이 이득(cross eye gain)으로  $G_c$ 의 크기가 증가할수록 재밍효과가 커지게 된다. 크로스 아이 이득은 두 재머 신호의 위상차와 진폭비에 의해서 결정되며, 그 관계는 다음과 같다<sup>[5]</sup>.

$$G_c = \frac{1 - a^2}{1 + 2a \cos \phi + a^2} \tag{2}$$

여기에서  $\phi$ 는 두 재머 신호의 위상차,  $a$ 는 두 재머 신호의 진폭비이다. 크로스 아이 이득은  $\phi$ 가 180°에 가까울수록  $a$ 가 1에 가까울수록 커지게 된다.

### III. 요구 성능 유도

크로스 아이 이득은 두 재머의 위상차와 진폭비에 의해서 결정되며, 두 재머 간의 위상차와 진폭비에 따른 크로스 아이 이득은 그림 3과 같다.

이때 크로스 아이 이득의 부호가 +일 때는 재머 1번 방

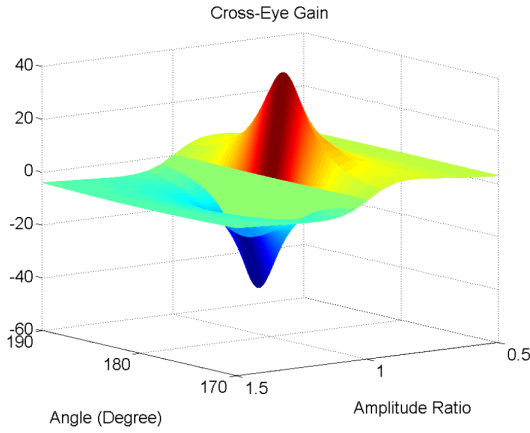


그림 3. 위상차와 진폭비에 따른 크로스 아이 이득  
Fig. 3. Cross eye gain for phase difference and amplitude ratio.

향, -일 때는 재머 2번 방향으로 모노펄스 레이더가 재밍되는 것을 의미한다.

고정된 값의 크로스 아이 이득을 가정하고, 위상차를 진폭비에 대한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\phi = \cos^{-1} \left[ \frac{1}{2G_c} \left\{ \frac{1-G_c}{a} - (1+G_c)a \right\} \right] \quad (3)$$

위 식을 이용하여 그림 3의 수평 단면을 아래와 같이 등고선 형태로 나타낼 수 있다. 그림 4에는 크로스 아이 이득에 따른  $\phi$ 와  $a$ 의 경계를 식 (3)을 이용하여 나타내었다.

여기서 역함수를 나타내기 위해 역코사인(arc cosine)의

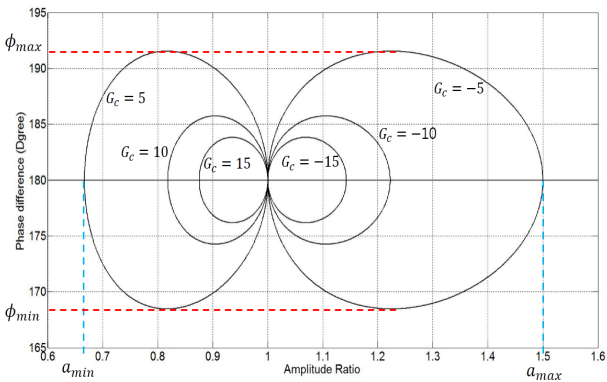


그림 4. 크로스 아이 이득에 따른  $\phi$ 와  $a$ 의 경계  
Fig. 4. Boundaries of  $\phi$  and  $a$  for cross eye gain.

범위는  $0 \sim 180^\circ$ 로 설정하였으며, 코사인 함수의 특성상  $180^\circ$ 를 기준으로  $180 \sim 360^\circ$  영역은 대칭 형태로 나타난다.

그림 4에서 알 수 있듯이, 특정 크로스 아이 이득값을 얻기 위해서 위상차는  $\phi_{min} \sim \phi_{max}$  사이, 진폭비는  $a_{min} \sim 1$  사이의 값(크로스 아이 이득이 음수일 경우  $1 \sim a_{max}$ )을 가져야 하는 것을 알 수 있다. 이때  $\phi_{min}$ ,  $\phi_{max}$ ,  $a_{min}$ ,  $a_{max}$ 는 목표 크로스 아이 이득을 달성하기 위해 크로스 아이 시스템을 설계 및 구현할 때 요구되는 성능 파라미터가 된다.

이제 각 요구 성능 파라미터를 크로스 아이 이득에 대한 수식으로 유도한다. 우선,  $a_{min}$ 은 식 (2)에서  $\phi = 180^\circ$ 일 때 1이 아닌  $a$ 의 해를 구하여 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$a_{min} = \frac{G_c - 1}{G_c + 1} \quad \text{for } G_c \geq 0 \quad (4)$$

$$a_{max} = \frac{G_c - 1}{G_c + 1} \quad \text{for } G_c < 0 \quad (5)$$

다음으로  $\phi_{min}$ 는 식 (3)의 최소값, 즉 미분값이 0이 되는 지점의  $\phi$  값이다.  $\phi$ 를  $a$ 에 대해 미분하여 0이 되는 지점  $a_p$ 을 찾으면 다음과 같다.

$$\frac{d\phi}{da} = \frac{\frac{1-G_c}{a_p^2} + (1+G_c)}{2G_c \sqrt{1 - \left[ \frac{1}{2G_c} \left\{ \frac{1-G_c}{a_p} - (1+G_c)a_p \right\} \right]^2}} = 0 \quad (6)$$

$$a_p = \sqrt{\frac{G_c - 1}{G_c + 1}} \quad (7)$$

$a_p$ 를 식 (3)에 대입하면  $\phi_{min}$ 을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\phi_{min} = \cos^{-1} \left( - \sqrt{\frac{G_c^2 - 1}{G_c^2}} \right) \quad (8)$$

코사인 함수의 대칭성으로  $\phi_{max}$ 는 다음과 같이 계산된다.

$$\phi_{max} = 2\pi - \phi_{min} \quad (9)$$

이상으로 크로스 아이 시스템의 요구 성능 파라미터를 목표 크로스 아이 이득에 대한 함수로 유도하였다.

#### IV. 성능분석

크로스 아이 시스템에서 요구되는 성능은 적용 무기 체계에 따라 다양한 값을 가질 수 있다. 앞서 유도한 수식을 이용하면 목표 크로스 아이 이득에 따라 요구되는 최소 진폭비와 최소 위상차를 편리하게 계산할 수 있다. 그림 5에는 크로스 아이 이득에 따른 최소 진폭비를 이상적인 경우와 백색 잡음이 존재하는 경우에 대해 나타내었다.

백색 잡음이 존재하는 경우에는 잡음으로 인한 신호 크기 변화가 발생하기 때문에 잡음의 크기에 비례하여 맞추어야 하는 최소 진폭비가 증가하게 된다. 즉, SNR (Signal-to-Noise Ratio)이 감소할수록 요구되는 최소 진폭비가 증가한다. 그림 5에서 알 수 있듯이, 목표 크로스 아이 이득이 5일 때, 이상적인 경우에는 최소 진폭비 약 0.65 이상, SNR이 15 dB인 경우에는 최소 진폭비 약 0.7 이상, SNR이 10 dB인 경우에는 최소 진폭비 약 0.75 이상이 요구되는 것을 확인할 수 있다. 또한, 목표 크로스 아이 이득이 10일 때, 이상적인 경우에는 최소 진폭비 약 0.8 이상, SNR이 15 dB인 경우에는 최소 진폭비 약 0.85 이상, SNR이 10 dB인 경우에는 최소 진폭비 약 0.9 이상이 요구되는 것을 확인할 수 있다.

그림 6에는 크로스 아이 이득에 따른 최소 위상차를 나타내었다. 그림 6에서 알 수 있듯이, 목표 크로스 아이 이

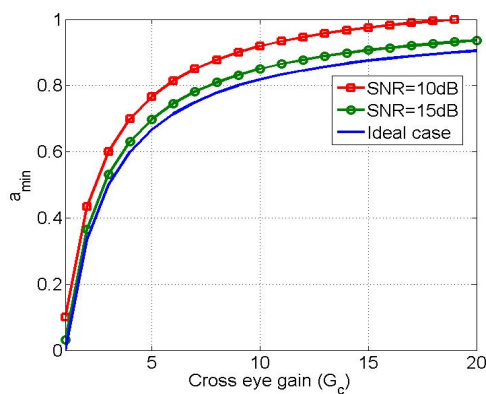


그림 5. 크로스 아이 이득에 대한  $a_{min}$   
Fig. 5.  $a_{min}$  for cross eye gain.

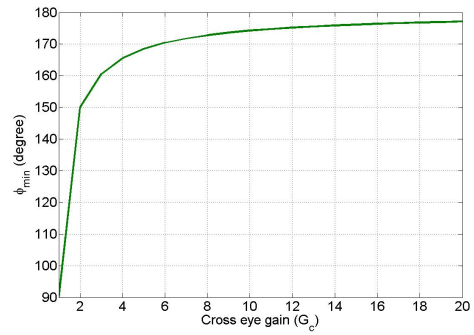


그림 6. 크로스 아이 이득에 대한  $\phi_{min}$   
Fig. 6.  $\phi_{min}$  for cross eye gain.

득이 4일 경우, 최소 위상차 165° 이상, 목표 크로스 아이 이득이 10일 경우, 최소 위상차 175° 이상이 요구되는 것을 확인할 수 있다.

#### V. 결 론

본 논문에서는 목표 크로스 아이 이득값을 만족할 수 있는 위상 오차 및 진폭 오차의 범위를 수학적으로 유도하고 그 결과를 분석하였다. 본 논문의 결과는 크로스 아이와 같은 전파면 왜곡 시스템을 설계하고 구현할 때 시스템 요구 성능을 결정하는 기준 자료로 활용될 수 있을 것이다.

#### References

- [1] S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House, 1984.
- [2] 양성욱, 박동민, 나영진, "추적 레이더용 Dual-band 모노펄스 수신기", *한국전자과학회논문지*, 17(8), pp. 767-772, 2006년 8월.
- [3] F. Neri, "Anti-monopulse jamming techniques", *IMOC 2001, International Microwave and Optoelectronics Conference*, pp. 45-50, 2001.
- [4] W. P. Plessis, J. W. Odendaal, and J. Joubert, "Experimental simulation of retrodirective cross-eye jamming", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 47, no. 1, pp. 734-740, Jan. 2011.
- [5] D. Schleher, *Electronic Warfare in the Information Age*, Artech House, Inc., 1999.